

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Kajian Pustaka

Berbagai macam bahan permesinan yang sudah banyak dilakukan oleh para peneliti guna memanfaatkan peluang yang ada untuk dikembangkan dan mencari sifat mekanis bahan tersebut. Ada beberapa tinjauan pustaka yang melandasi timbulnya gagasan untuk meneliti judul yang ditulis. karena adanya dorongan untuk mengetahui komposisi dan mengetahui kekerasan bahan AISI 3115 yang telah dilakukan proses *pack carburizing* dan proses *hardening*. Berikut ini merupakan beberapa referensi yang berkaitan yaitu:

Pada penelitian Pengaruh *Media Quenching Air Tersirkulasi (Circulated Water)* Terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan Pada Baja Aisi 1045, menyimpulkan Laju pendinginan dalam proses perlakuan panas setelah austenitisasi sepenuhnya mempengaruhi mikro struktur dan sifat baja. Quenching adalah proses pendinginan yang memiliki tingkat pendinginan yang tinggi. Tapi itu digunakan untuk melakukan memiliki kekurangan, yang menyebabkan tingkat pendinginan lebih rendah daripada yang seharusnya, itu disebabkan oleh pembentukan selimut uap yang tidak terputus di sekitar spesimen panas. Tapi, untuk mendapatkan fase martensit dan maksimal kekerasan, maka laju pendinginan yang dihasilkan pada pendinginan harus lebih tinggi, atau setidaknya sama dengan kritis tingkat pendinginan baja. Laju pendinginan, misalnya, ditentukan oleh jenis baja, dimensi dan ukuran baja-baja, dan kondisi pendinginan ketika pendinginan dilakukan. Tujuan dari percobaan ini adalah untuk memeriksa pengaruh agen quench yang digunakan, terhadap struktur mikro dan kekerasan baja AISI 1045. Eksperimen ini juga hasil penentuan ukuran spesimen, pembuatan instalasi quench agited, dan estimasi waktu pendinginan instalasi yang bisa dicapai. (Sri Nugroho dan Gunawan Dwi Haryadi, 2005).

Pada penelitian Pengaruh *Hardening* Pada Baja Jis G 4051 Grade S45c Terhadap Sifat Mekanis dan Struktur Mikro, Dari hasil – hasil pengujian, pemeriksaan serta dari pembahasan dapat di Tarik kesimpulan sebagai berikut : Kuat tarik maksimal adalah 1074 MPa di dapat dari bahan dengan temperature

pemanasan 860°C dan masuk rentang kuat tarik dari standar AISI – SAE 1045 atau JIS G4051 *grade* S45C . Nilai kekerasan tertinggi pada *sample* bahan atau material baja karbon standar AISI – SAE 1045 atau JIS G4051 *grade* S45C yang di beri perlakuan panas ( PP ). Pada temperatur pemanasan 920°C dengan nilai kekerasan Vicker's sebesar 579 HV dan masuk rentang nilai kekerasan Vicker's dari standar AISI – SAE 1045 atau JIS G4051 *grade* S45C. Struktur mikro pada sampel bahan atau material baja karbon standar AISI – SAE 1045 atau JIS G4051 *grade* S45C yang diberikan perlakuan panas ( PP ) pada temperatur pemanasan 800°C dan 860°C terbentuk fasa Martensite, sedangkan pada temperatur pemanasan 920°C terbentuk fasa – fasa Martensite dan Bainite. Dan pada sampel bahan atau material baja karbon standar AISI – SAE 1045 atau JIS G4051 *grade* S45C yang tidak diberikan perlakuan panas (TP) bentuk fasa awal adalah fasa – fasa Ferrite dan Pearlite. Kondisi anil pada struktur mikro sampel bahan atau material baja karbon standar AISI – SAE 1045 atau JIS G4051 *grade* S45C yang tidak di berikan perlakuan panas (TP), menunjukkan bahwa material sebelumnya telah mendapat perlakuan panas, sehingga proses penelitian tidak dapat mencapai hasil yang optimal. (Koos Sardjono KP, 2009).

Pada penelitian karakteristik mekanik proses *hardening* baja AISI 1045 media *quenching* untuk aplikasi *sprocket* rantai menganalisis tentang peningkatan kekerasan dan ketahanan aus pada baja AISI 1045 dengan media *quenching* volume air 15,20, 25 liter (Agus Pramono, 2011).

Rerata kekerasan pisau yang didinginkan dengan media pendingin yang berbedabeda adalah sebagai berikut. Air sumur memiliki rerata nilai kekerasan 652,64 HV, air garam memiliki rerata nilai kekerasan 836,56 HV, oli memiliki rerata nilai kekerasan 600 HV, udara memiliki rerata nilai kekerasan 335,44 HV. Adanya perbedaan hasil kekerasan dari penggunaan media pendingin yang berbeda yaitu air sumur, air garam, oli dan udara. Media pendingin oli merupakan media pendingin yang paling baik untuk digunakan dalam pembuatan pisau pemotong karena menghasilkan tingkat kekerasan yang tinggi dan tingkat kegetasan yang rendah pada pisau pemotong. ( Prihanto Trihutomo, 2015).

Pada penelitian Pengaruh Heat Treatment Dengan Variasi Media Quenching Air Garam Dan Oli Terhadap Struktur Mikro Dan Nilai Kekerasan

Baja Pegas Daun Aisi 6135. Telah dilakukan penelitian mengenai pengaruh heat treatment dengan variasi media quenching air garam dan oli terhadap struktur mikro dan nilai kekerasan baja pegas daun AISI 3165. Proses pemanasan dilakukan pada temperatur 800 selama 60 menit, lalu proses quenching dengan variasi media pendingin 100% air garam dan campuran 50% air garam : 50% oli, dan tempering pada temperatur 600 selama 45 menit. Hasil uji komposisi kimia menunjukkan baja pegas daun termasuk baja karbon sedang ( $C=0,343\%$ ) dan baja chromium-vanadium (AISI 6135). Hasil uji kekerasan sampel raw material sebesar 42,27 HRc, sampel dengan media quenching 100% air garam sebesar 34,27% HRc, dan sampel dengan media quenching campuran 50% air garam : 50% oli sebesar 38,27 HRc. Hasil struktur mikro pada sampel raw material menunjukkan fasa ferit dan perlit. Sampel hasil quench-temper menggunakan media quenching 100% air garam terbentuk fasa ferit, austenit sisa dan martensit temper yang lebih rapat dan menyebar merata dibandingkan sampel hasil media quenching campuran 50% air garam : 50% oli, sehingga nilai kekerasan menurun (Anggun Mersilia, 2016).

Pada penelitian Pengaruh Media Pendingin Pada Proses *Hardening* Material Baja S45c. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan, yaitu Hasil yang diperoleh uji kekerasan air garam memiliki nilai rata-rata kekerasan 95 BHN, nilai rata-rata kekerasan oli 89 BHN, nilai rata-rata kekerasan air 94 BHN, nilai rata-rata kekerasan udara 87 BHN dan nilai kekerasan tanpa di hardening 88 BHN. uji impact pada udara memiliki nilai rata-rata 1,175 J/mm<sup>2</sup>, nilai rata-rata impact air garam 0,257 J/mm<sup>2</sup>, nilai rata-rata impact air 0,369 J/mm<sup>2</sup>, nilai rata-rata impact oli 1,128 J/mm<sup>2</sup> dan nilai rata-rata impact tanpa dihardening 0,955 J/mm<sup>2</sup>. (Syaifudin Yuri, dkk. 2016).

Pada Penelitian Pengaruh Temperatur, Holding Time Proses Pack Carburizing Baja Karbon Terhadap Sifat Fisik Dan Mekanik. Baja merupakan suatu material yang mempunyai peranan penting dalam dunia industri. Baja sering kali digunakan sebagai bahan dasar pembuatan komponen mesin maupun bahan konstruksi. Untuk mendapatkan jenis material yang memiliki sifat-sifat yang dikehendaki dapat dilakukan dengan perlakuan kembali terhadap material dengan teknik yang terarah. Salah satu cara untuk mengubah sifat dari baja karbon adalah

dengan metode pack carburizing. Penelitian ini memiliki tujuan menentukan harga kekuatan tarik, kekerasan, analisa struktur mikro pada proses pack carburizing variasi temperatur dan holding time, dan analisa komposisi baja karbon pada material dasar. Metode penelitian ini adalah eksperimen melalui pengujian laboratorium baja karbon dengan metode pack carburizing variasi temperatur dan holding time terhadap sifat fisik dan mekanik. Hasil pengujian kuat tarik material dasar sebesar 1,212 kN/mm<sup>2</sup> , sedangkan harga kuat tarik terbesar pada variasi temperatur 875 oC pada holding time 10 menit yaitu sebesar 8,27 kN/mm<sup>2</sup> . Hasil uji kekerasan material dasar sebesar 2,842 HV, sedangkan harga kekerasan terbesar pada variasi temperatur 875 oC pada holding time 10 menit yaitu sebesar 9,672 HV. Hasil uji struktur mikro terhadap material dasar adalah ferrit, perlite, dan martensite, sedangkan struktur mikro material setelah proses pack carburizing semua sama yaitu peralite dan martensite. Hasil uji komposisi terhadap material dasar yaitu material baja karbon tinggi (Mohammad Nurhilal,2017).

Pada penelitian Pengaruh Media Quenching Terhadap Kekerasan Dan Struktur Mikro Paska Hardfacing. menyimpulkan Hardfacing dengan proses SMAW merupakan salah satu teknik yang paling banyak digunakan, karena sangat mudah diaplikasikan seperti pada scoops lift buckets , Ripper Teeth, dan Dozer Blades.. Hardfacing pada komponen ini bertujuan untuk mencegah keausan yang diakibatkan benturan atau gesekan saat penggalian tanah, pengumpulan tanah, pengangkutan tanah pada saat alat berat sedang bekerja. Setelah baja karbon rendah di hardfacing, kemudian dilakukan perlakuan panas dengan Quenching dengan tujuan lebih meningkatkan kekerasan dari material. Pembuatan spesimen dilakukan dengan teknik SMAW polaritas AC arus 100A menggunakan elektroda HV 450 kemudian spesimen di potong, di lakukan proses heat treatment. Setelah selesai kemudian speseimen di uji keras dan dilakukan pengamatan dengan mikroskop optik. Media air merupakan media yang paling optimal dalam meningkatkan kekerasan dari hasil hardfacing. Nilai kekerasan yang didapatkan dari hasil quenching dengan media air adalah sebesar 422.66 VHN (Basori, 2018).

Pada penelitian Pengaruh Viskositas Media Celup Terhadap Kekerasan Dan Struktur Mikro Martensitic White Cast Iron Astm A532, menyimpulkan Besi

tuang putih memiliki keunggulan yaitu tahan aus, tahan korosi, kekuatan dan keuletan yang tinggi serta tahan terhadap perubahan suhu. Besi tuang putih banyak digunakan pada industri pembuatan roda kereta api, rol untuk menggerus (grinding), dan plat penghancur batu. Kelemahan dari besi tuang putih tersebut adalah ketahanan terhadap keausan belum maksimal. Peningkatan ketahanan terhadap keausan salah satunya dengan proses heat treatment. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui pengaruh viskositas pada media celup terhadap kekerasan dan struktur mikro besi tuang putih martensitik ASTM A532. Spesimen besi tuang putih martensitik ASTM A532 merk CR 12, CR 17, CR 21 dengan ukuran 15 mm x 10 mm x 10 mm, selanjutnya dilakukan proses uji komposisi, heat treatment dengan suhu 900°C ditahan 30 menit, lalu dicelupkan media oli dengan viskositas SAE 10, SAE 30, SAE 50. Pengujian meliputi uji kekerasan vickers dan pengamatan struktur mikro. Hasil pengujian komposisi kimia menunjukkan ASTM A532 CR12 mempunyai unsur C (carbon) sebesar 1.75% dan unsur Cr (Chromium) sebesar 14.24% masuk dalam kategori golongan besi tuang putih martensitik ASTM A532 Type A. ASTM A532, pada spesimen CR17 mempunyai unsur C (carbon) sebesar 2.15%, unsur Cr (Chromium) sebesar 17.90%, masuk golongan ASTM A532 Class II Type B. Dan CR21 mempunyai unsur C (carbon) sebesar 3,15%, unsur Cr (chromium) sebesar 19,25% termasuk golongan ASTM A532 Type E. Hasil struktur mikro ASTM A532 terdiri dari struktur martensit, perlit dan Carbida Cr. Hasil pengujian kekerasan media quenching oli (SAE 10, SAE 30 dan SAE 50) untuk merk CR 12, CR 17, CR 21 nilai kekerasan berbeda jauh (signifikan). Kekerasan tertinggi dari ketiga merk besi tuang putih adalah CR 12 sebesar 1017,5 Kg/mm<sup>2</sup> pada quenching SAE 10, struktur martensit menjadi berkurang namun carbida Cr bertambah sehingga kekerasan menjadi tinggi. Dan kekerasan terendah pada CR 21 yaitu 600,1 Kg/mm<sup>2</sup> pada quenching SAE 50, pemanasan akan menurunkan jumlah martensit dan carbida sehingga kekerasan menurun (Subardi, dkk 2011).

Pada penelitian Pengaruh Proses Quenching Dan Tempering Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Baja Karbon Rendah Dengan Paduan Laterit, menyimpulkan Penelitian ini menunjukkan adanya pengaruh perlakuan panas terhadap sifat mekanik dan struktur mikro pada baja karbon rendah dengan

paduan laterit. Perlakuan panas quenching dengan media air, oli dan udara dapat meningkatkan kekerasan yang tinggi dan dilakukan perlakuan panas tempering untuk memperbaiki sifat material menjadi lebih ulet dengan menurunkan sedikit nilai kekerasan. Berdasarkan hasil penelitian dan pengujian yang telah dilakukan dan pembahasan pada proses quenching dan tempering pada baja karbon rendah laterit terhadap sifat mekanik (kekerasan dan ketangguhan) dan struktur mikro, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Dari pengujian kekerasan pada baja karbon laterit hasil proses quenching dan tempering diperoleh nilai kekerasan tertinggi pada sampel dengan media quenching air dibandingkan dengan media quenching oli dan udara. Hal tersebut terjadi karena media quenching air memiliki kekentalan yang lebih rendah dibandingkan media quenching oli dan massa jenis lebih besar dibandingkan dengan media quenching udara. Sehingga waktu proses pendinginan lebih cepat dibandingkan media quenching oli dan udara, dengan nilai kekerasan sebesar 459,7 HV, 441,3 HV, 425,3 HV dan 391 HV.
2. Dari pengujian ketangguhan baja laterit diperoleh nilai ketangguhan tertinggi pada sampel dengan media quenching udara dibandingkan dengan media quenching air dan oli. Hal tersebut terjadi karena media quenching udara memiliki massa jenis lebih rendah dibandingkan dengan media quenching air dan oli sehingga waktu proses pendinginan lebih lambat, dengan nilai ketangguhan 1,325 J/mm<sup>2</sup>, 1,437 J/mm<sup>2</sup>, 1,537 J/mm<sup>2</sup> dan 1,625 J/mm<sup>2</sup>.
3. Dari data hasil pengujian pengaruh proses tempering terhadap nilai kekerasan dan nilai ketangguhan adalah semakin tinggi temperature tempering maka semakin rendah nilai kekerasan yang didapat dan semakin tinggi nilai ketangguhan.
4. Dari hasil pengamatan struktur mikro pada media quenching air terbentuk fasa martensit dan austenite sisa karena waktu pendinginan yang sangat cepat, kemudian pada media quenching oli terbentuk fasa sedikit martensit, bainit dan austenite sisa, karena waktu pendinginan lebih lambat dibandingkan media quenching air. Sedangkan pada media quenching udara fasa yang terbentuk adalah ferit dan pearlite karena waktu pendinginan yang sangat lambat dibandingkan media quenching air dan oli. (Iman Saefuloh, 2018).

## 2.2 Pengertian Baja

Baja adalah besi karbon campuran logam yang dapat berisi konsentrasi dari element campuran lainnya, ada ribuan campuran logam lainnya yang mempunyai perlakuan bahan dan komposisi berbeda. Sifat mekanis adalah sensitif kepada isi dari pada karbon, yang mana secara normal kurang dari 1,0%C. Sebagian dari baja umum digolongkan menurut konsentrasi karbon, yakni ke dalam rendah, medium dan jenis karbon tinggi.

Baja merupakan bahan dasar vital untuk industri. Semua segmen kehidupan, mulai dari peralatan dapur, transportasi, generator pembangkit listrik, sampai kerangka gedung dan jembatan menggunakan baja. Besi baja menduduki peringkat pertama di antara barang tambang logam dan produknya melingkupi hampir 90 % dari barang berbahan logam. (Wendhy Irlamsyah. 2015)

## 2.3 Pengaruh Unsur Paduan Pada Baja

Sifat baja sangat tergantung pada unsur-unsur yang terkandung didalamnya. Unsur-unsur paduan ditambahkan untuk mengurangi sifat yang tidak diinginkan pada baja karbon dan memperbaiki atau menambah sifat-sifat lain yang dikehendaki (Arian Yullianto. 2011). Pengaruh dari beberapa unsur paduan terhadap sifat baja paduan dikemukakan dibawah ini:

### a. Karbon (C)

Pada baja-baja perkakas, persentase karbon antara 0,1 - 0,6 %. Karbon juga merupakan unsur penting yang mempengaruhi harga kekerasan dalam pembentukan fasa martensit. Selain itu kenaikan kandungan karbon akan berpengaruh pada kekuatan tarik (*tensile strength*), menaikkan keuletan (*ductility*) dan sifat mampu las (*weldability*) akan menurun dengan naiknya kandungan karbon.

### b. Mangan (Mn)

Semua baja mengandung mangan karena sangat diperlukan dalam proses pembuatan baja. Kandungan mangan kurang lebih 0,6 % masih belum dikatakan paduan dan tidak mempengaruhi sifat baja. Dengan bertambahnya kandungan mangan suhu kritis seimbang. Baja dengan 12 % Mn adalah austenit karena itu suhu kritisnya dibawah suhu kamar akibatnya baja tidak dapat diperkeras. Unsur ini dapat berfungsi sebagai deoksidasi dari baja dan dapat mengikat sulfur dengan

membentuk senyawa MnS yang titik cairnya lebih tinggi dari titik cair baja. Dengan demikian akan dapat mencegah pembentukkan Fe, S, yang titik cairnya lebih rendah dari titik cair baja. Akibatnya kegetasan pada suhu tinggi dapat dihindari, disamping itu menguatkan fasa ferit.

*c. Silikon (Si)*

Silikon berfungsi sebagai deoksidasi, silikon juga dapat menaikkan hardenability dalam jumlah sedikit, tetapi dalam jumlah yang banyak akan menurunkan keuletan. Biasanya unsur-unsur kimia lainnya seperti mangan, molybdenum dan chromium akan muncul dengan adanya silikon. Kombinasi silikon dengan unsur-unsur tersebut akan menambah kekuatan dan ketangguhan dari baja.

*d. Chromium (Cr)*

Chromium ditemukan dalam jumlah yang banyak pada baja-baja perkakas dan merupakan elemen penting setelah karbon. Chromium merupakan salah satu unsur-unsur pembentuk karbida dan dapat meningkatkan ketahanan korosi dengan membentuk lapisan oksida di permukaan logam.

*e. Nikel (Ni)*

Nikel mempunyai pengaruh yang sama seperti mangan yaitu menurunkan suhu kritis dan kecepatan pendinginan kritis, memperbaiki kekuatan tarik, tahan korosi. Meningkatkan ketangguhan atau ketahanan terhadap beban benturan (impact).

*f. Vanadium (V)*

Vanadium dalam baja-baja perkakas berperan sebagai salah satu unsur pembentuk karbida. Vanadium juga merupakan unsur penyetabil martensit. Pada saat proses temper, karbida vanadium berpresipitat di batas butir ferit. Hal ini akan menaikkan harga kekerasan. Biasanya terjadi pada temperatur temper 500 - 600°C. Vanadium dapat menurunkan *hardenability* karena karbida-karbida yang terbentuk dapat menghambat pengintian dan pertumbuhan butir austenit. Tetapi pada temperatur tinggi, dimana karbida vanadium larut, unsur ini dapat meningkatkan *hardenability*.

*g. Molybdenum (Mo)*

Unsur ini dapat menguatkan fasa ferit dan menaikkan kekuatan baja tanpa kehilangan keuletan. Molybdenum juga dapat berfungsi sebagai penyetabil



karbida, sehingga mencegah pembentukan grafit pada pemanasan yang lama. Karena itu penambahan Mo kedalam baja dapat menaikkan kekuatan dan ketahanan terhadap creep pada suhu tinggi.

#### *h. Tungsten (W)*

Tungsten juga merupakan salah satu unsur pembentuk karbida kompleks pada baja-baja perkakas. Karbida kompleks ini terbentuk dengan adanya pendinginan yang sangat lambat. Karbida ini bersifat meningkatkan kekerasan

#### *i. Sulfur (S)*

Sulfur dapat membuat baja menjadi getas pada temperatur tinggi, oleh karena itu dapat merugikan baja yang digunakan pada suhu tinggi. Umumnya kadar sulfur harus dikontrol serendah-rendahnya, yaitu kurang dari 0,05 %.

#### *j. Phospor (P)*

Phospor dalam jumlah besar dalam baja dapat menaikkan kekuatan dan kekerasan, tetapi juga menurunkan keuletan dan ketangguhan impak. Pada baja-baja konstruksi kandungan phosphor dibatasi dengan kandungan maksimum yang biasanya tidak lebih dari 0,05%.

## **2.4 Klasifikasi Baja**

### **2.4.1 Berdasarkan Prosentase Karbon**

Berdasarkan tinggi rendahnya prosentase karbon di dalam baja, baja karbon diklasifikasikan (Albar. 2011) sebagai berikut:

#### **2.4.1.1 Baja Karbon Rendah (*low carbon steel*)**

Baja karbon rendah mengandung karbon antara 0,10 s/d 0,30 %. Baja karbon ini dalam perdagangan dibuat dalam plat baja, baja strip dan baja batangan atau profil. Berdasarkan jumlah karbon yang terkandung dalam baja, maka baja karbon rendah dapat digunakan atau dijadikan baja-baja sebagai berikut:

1. Baja karbon rendah yang mengandung 0,04 % - 0,10% C. untuk dijadikan baja – baja plat atau strip.
2. Baja karbon rendah yang mengandung 0,05% C digunakan untuk keperluan badan-badan kendaraan.
3. Baja karbon rendah yang mengandung 0,15% - 0,30% C digunakan untuk konstruksi jembatan, bangunan, membuat baut atau dijadikan baja konstruksi.

### **2.4.1.2 Baja Karbon Menengah (*medium carbon steel*)**

Baja karbon menengah mengandung karbon antara 0,30% - 0,60% C. Baja karbon menengah ini banyak digunakan untuk keperluan alat-alat perkakas bagian mesin. Berdasarkan jumlah karbon yang terkandung dalam baja maka baja karbon ini dapat digunakan untuk berbagai keperluan seperti untuk keperluan industri kendaraan, roda gigi, pegas dan sebagainya.

### **2.4.1.3 Baja Karbon Tinggi (*high carbon steel*)**

Baja karbon tinggi mengandung kadar karbon antara 0,60% - 1,7% C dan setiap satu ton baja karbon tinggi mengandung karbon antara 70 – 130 kg. Baja ini mempunyai tegangan tarik paling tinggi dan banyak digunakan untuk material tools. Salah satu aplikasi dari baja ini adalah dalam pembuatan kawat baja dan kabel baja. Berdasarkan jumlah karbon yang terkandung didalam baja maka baja karbon ini banyak digunakan dalam pembuatan pegas, alat-alat perkakas seperti: palu, gergaji atau pahat potong. Selain itu baja jenis ini banyak digunakan untuk keperluan industri lain seperti pembuatan kikir, pisau cukur, mata gergaji dan lain sebagainya.

## **2.5 Berdasarkan Komposisi**

Dalam prakteknya baja terdiri dari beberapa macam yaitu:

### **2.5.1 Baja Karbon ( Carbon Steel )**

Terdiri atas beberapa unsur, yang paling utama adalah karbon ( C ), unsur yang lainnya yaitu Si ( dari batu tahan api), Mn, S dan P ( dari kokas untuk Carbon Enrichment, S dan P Maksimum 0,05% ) (Albar. 2011).

Beberapa macam baja karbon, yaitu:

- a. Baja karbon rendah
- b. Baja karbon medium
- c. Baja karbon tinggi

Sebagian kelompok baja didesain untuk laku panas dalam daerah austenit, disusul dengan pendinginan dan dekomposisi austenit secara langsung atau tak langsung membentuk ferrit dan karbida. Bila baja hanya mengandung besi dan karbon, paduannya disebut baja karbon.

### 2.5.2 Baja Paduan ( *Alloyed Steel* )

Baja paduan adalah campuran antara baja karbon dengan unsur-unsur lain yang akan mempengaruhi sifat-sifat baja misalnya sifat kekerasan, liat, kecepatan membeku, titik cair, dan sebagainya yang bertujuan memperbaiki kualitas dan kemampuannya. Penambahan unsur-unsur lain dalam baja karbon. (Albar. 2011).

#### a. Baja Paduan Rendah

Baja paduan rendah adalah salah satu klasifikasi dari baja paduan (*alloy steel*) yaitu : *low alloy steel*, *medium alloy*, dan *high alloy steel*. Klasifikasi ini dibedakan menurut unsur paduannya. Baja paduan rendah (*low alloy steel*) tergolong jenis baja karbon yang memiliki tambahan unsur paduan seperti nikel, chromium dan molybdenum. Total unsur paduannya mencapai 2,07% - 2,5%.

Untuk kebanyakan baja paduan rendah (*low alloy steel*) fungsi utama dari elemen paduannya adalah untuk menambah kekerasan yang diinginkan untuk meningkatkan kemampuan mekanik dan keuletannya setelah dilakukan proses perlakuan panas. Di beberapa kasus, bagaimana juga tambahan unsur paduan digunakan untuk mengurangi efek degradasi karena lingkungan terhadap kondisi pemakaian.

Baja paduan rendah (*low alloy steel*) dapat diklasifikasikan lagi, yaitu :

- a. Menurut komposisi kimia, seperti : nikel steel, nikel-chromium steels, molybdenum steels, chromium-molybdenum steels.
- b. Menurut proses perlakuan panas, seperti : quenched and tempered (QT), normalized and tempered (NT), annealed (A) dan sebagainya.

### 2.6 Baja Karbon Rendah AISI 3115

Baja AISI 3115 adalah baja karbon yang mempunyai kandungan karbon sekitar 0,15 % dan termasuk golongan baja karbon rendah (PT. Tira Andalan Steel, 2019) Baja spesifikasi ini banyak digunakan sebagai komponenomotif misalnya untuk komponen *gears* dan *bushing* pada kendaraan bermotor. Komposisi kimia.

Tabel 2.1 Komposisi Baja Karbon Rendah AISI 3115

Komposisi Baja Karbon Rendah AISI 3115			
C	Mn	Cr	Ni
0,15%	0,60%	1,70%	1,70%

(Sumber : PT. Tira Andalan Steel, 2019)

Baja AISI 3115 disebut sebagai *Nickel-chromium steels* karena sesuai dengan pengkodean internasional, yaitu seri 3xxx berdasarkan nomenklatur yang dikeluarkan oleh AISI dan SAE (Society of Automotive Engineers). Pada angka 1 pertama merupakan kode yang menunjukkan jenis baja, kemudian kode ke 2 setelah angka 1 penambahan sulfur dan 2 angka terakhir menunjukkan komposisi karbon (<https://mechanicalbrothers.wordpress.com>) Jadi baja AISI 3115 berarti *Nickel-chromium steels* yang mempunyai komposisi karbon sebesar 0,15%. Baja spesifikasi ini banyak digunakan sebagai komponen gears, dan bushing (PT. Tira Andalan Steel, 2019). Pada aplikasinya ini baja tersebut harus mempunyai ketahanan aus yang baik karena sesuai dengan fungsinya harus mampu menahan keausan akibat bergesekan dengan rantai. Ketahanan aus didefinisikan sebagai ketahanan terhadap abrasi atau ketahanan terhadap pengurangan dimensi akibat suatu gesekan (Avner, 1974). Pada umumnya ketahanan aus berbanding lurus dengan kekerasan.

## 2.7 Perlakuan panas (*Heat Treatment*)

Perlakuan panas adalah suatu proses pemanasan dan pendinginan logam dalam keadaan padat untuk mengubah sifat-sifat fisik logam tersebut. Baja dapat dikeraskan sehingga tahan aus dan kemampuan memotong meningkat, atau baja dapat dilunakkan untuk dapat memudahkan permesinan lebih lanjut. Melalui perlakuan panas yang tepat, tegangan dalam dapat dihilangkan, besar butir diperbesar atau diperkecil, ketangguhan ditingkatkan atau dapat dihasilkan suatu permukaan yang keras disekeliling inti yang ulet. Maksud perlakuan panas tersebut secara garis besar menyangkut:

- Meningkatkan kekerasan dan keuletan.
- Menghilangkan tegangan dalam
- Melunakkan Baja
- Menormalkan keadaan baja biasa dari akibat pengaruh-pengaruh pengerjaan dan perlakuan panas sebelumnya.
- Menghaluskan butir-butir kristal atau kombinasi dari maksud-maksud

tersebut diatas.

Proses perlakuan panas ada beberapa macam, yaitu :

- a. *Softening* (pelunakan) : adalah usaha untuk menurunkan sifat mekanik agar menjadi lunak dengan cara mendinginkan material yang sudah dipanaskan didalam tungku (*annealing*) atau mendinginkan dalam udara terbuka (*normalizing*).

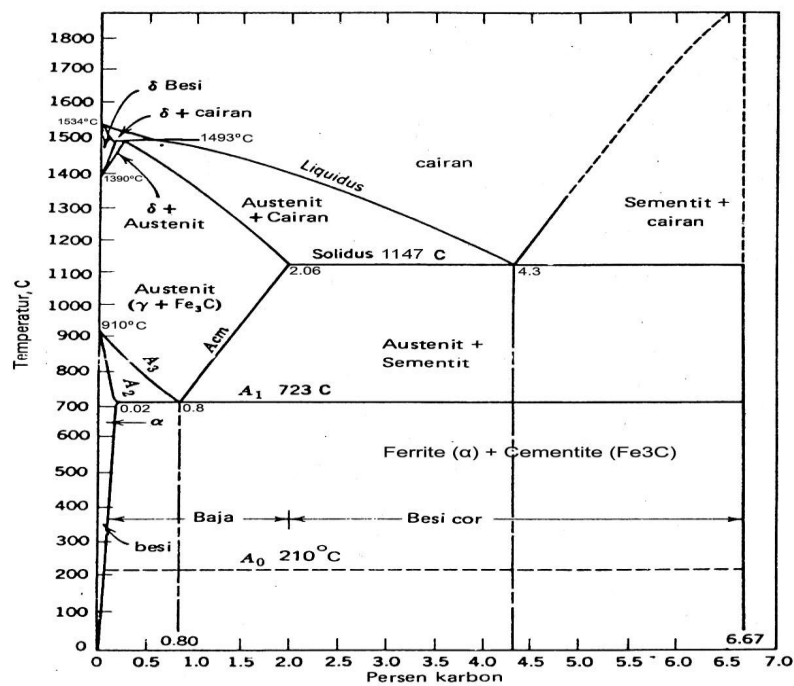
Contoh : *annealing, normalizing, tempering*.

- b. *Hardening* (pengerasan) : adalah usaha untuk meningkatkan sifat material terutama kekerasan dengan cara celup cepat (*quenching*) material yang sudah dipanaskan ke dalam suatu media quenching berupa air, air garam, maupun oli. Contoh : *surface hardening dan quenching*.

- c. *Carburizing* (Pengerasan permukaan Luar) adalah cara pengerasan permukaan luar dari suatu material baja atau besi kadar karbon rendah agar menjadi keras pada lapisan luar atau memiliki kadar karbon tinggi pada lapisan luarnya. Biasanya suhu pada proses karburasi adalah 1700°F. setelah proses pendinginan maka pada permukaan baja dapat dilihat dengan mikroskop bahwa terdapat bagian – bagian hypereutectoid, zona yang terdiri dari perlit dan jaringan sementit yang putih, diikuti zona eutektoid, hanya terdiri dari perlit dan terakhir adalah zona hypoeutectoid, yang terdiri dari perlit dan ferrit, dimana jumlah ferrit meningkat hingga pusat dicapai.

## 2.8 Diagram Fasa Besi Karbon (Fe-C)

Diagram fasa Fe-C atau biasa disebut diagram kesetimbangan besi karbon merupakan diagram yang menjadi parameter untuk mengetahui segala jenis fasa yang terjadi didalam baja, serta untuk mengetahui faktor-faktor apa saja yang terjadi pada paduan baja dengan segala perlakuannya.



Gambar 2.1 Diagram Kesetimbangan Fe-C<sup>10</sup>  
(Sumber : Rahman,2014)

Dari diagram fasa yang ditunjukkan pada gambar 2.2 terlihat bahwa suhu sekitar 723°C merupakan suhu transformasi austenit menjadi fasa perlit (yang merupakan gabungan fasa ferit dan sementit). Transformasi fasa ini dikenal sebagai reaksi eutectoid dan merupakan dasar proses perlakuan panas dari baja. Sedangkan daerah fasa yang prosentase larutan karbon hingga 2 % yang terjadi di temperatur 1.147°C merupakan daerah besi gamma ( $\gamma$ ) atau disebut austenit. Pada kondisi ini biasanya austenit bersifat stabil, lunak, ulet, mudah dibentuk, tidak ferro magnetis dan memiliki struktur kristal *Face Centered Cubic* (FCC).

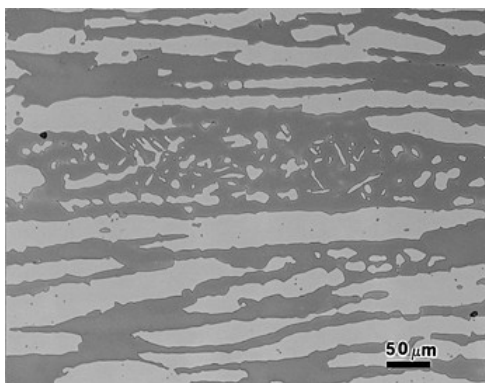
Besi murni pada suhu dibawah 910°C mempunyai struktur kristal *Body Centered Cubic* (BCC). Besi BCC dapat melarutkan karbon dalam jumlah sangat rendah, yaitu sekitar 0,02 % maksimum pada suhu 723°C. Larutan pada intensitas dari karbon didalam besi ini disebut juga besi alpha ( $\alpha$ ) atau fasa ferit. Pada suhu diantara 910°C sampai 1.390°C, atom-atom besi menyusun diri menjadi bentuk kristal *Face Centred Cubic* (FCC) yang juga disebut besi gamma ( $\gamma$ ) atau fasa austenit. Besi gamma ini dapat melarutkan karbon dalam jumlah besar yaitu sekitar 2,06 % maksimum pada suhu sekitar 1.147°C. Penambahan karbon ke dalam besi FCC ditransformasikan kedalam struktur BCC dari 910°C menjadi

723°C pada kadar karbon sekitar 0,8 %. Diantara temperatur 1.390°C dan suhu cair 1.534°C, besi gamma berubah menjadi susunan BCC yang disebut besi delta ( $\delta$ ).

Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan didalam diagram Fe – Fe<sub>3</sub>C yaitu, perubahan fasa ferit atau besi alpha ( $\alpha$ ), austenit atau besi gamma ( $\gamma$ ), sementit atau karbida besi, perlit dan sementit akan diuraikan dibawah ini :

a. *Ferrite atau besi alpha ( $\alpha$ )*

Merupakan modifikasi struktur besi murni pada suhu ruang, dimana ferit menjadi lunak dan ulet karena ferit memiliki struktur BCC, maka ruang antara atom-atomnya adalah kecil dan padat sehingga atom karbon yang dapat tertampung hanya sedikit sekali.



Gambar.2.2 ferit  
(Sumber : Rahman,2014)

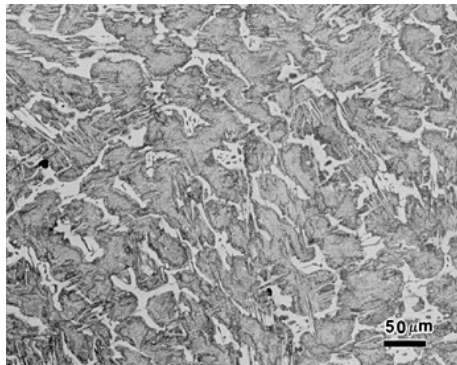
b. *Austenit atau besi gamma ( $\gamma$ )*

Merupakan modifikasi dari besi murni dengan struktur FCC yang memiliki jarak atom lebih besar dibandingkan dengan ferit. Meski demikian rongga-rongga pada struktur FCC hampir tidak dapat menampung atom karbon dan penyisipan atom karbon akan mengakibatkan tegangan dalam struktur sehingga tidak semua rongga dapat terisi, dengan kata lain daya larutnya jadi terbatas.

c. *Karbida Besi atau Sementit*

Adalah paduan Besi karbon, dimana pada kondisi ini karbon melebihi batas larutan sehingga membentuk fasa kedua atau karbida besi yang memiliki komposisi Fe<sub>3</sub>C. Hal ini tidak berarti bila karbida besi membentuk molekul Fe<sub>3</sub>C, akan tetapi kisi kristal yang membentuk atom besi dan karbon

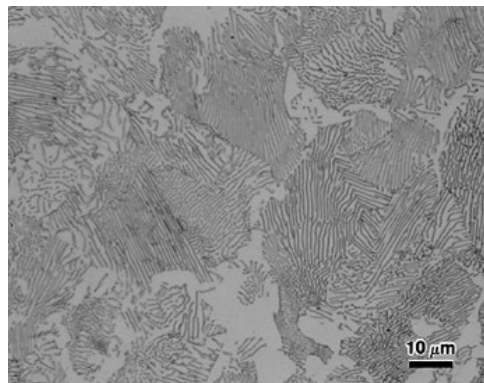
mempunyai perbandingan 3 : 1. Karbida pada ferit akan meningkatkan kekerasan pada baja sifat dasar sementit adalah sangat keras.



Gambar.2.3 Sementit  
(Sumber : Rahman,2014)

*d. Perlit*

Merupakan campuran khusus yang terjadi atas dua fasa yang terbentuk austenisasi, dengan komposisi eutektoid bertransformasi menjadi ferit dan karbida. Ini dikarenakan ferit dan karbida terbentuk secara bersamaan dan keluarnya saling bercampur. Apabila laju pendinginan dilakukan secara perlahan-lahan maka atom karbon dapat berdifusi lebih lama dan dapat menempuh jarak lebih jauh, sehingga di peroleh bentuk perlit besar. Dan apabila laju pendinginan lebih di percepat lagi maka *difusi* akan terbatas pada jarak yang dekat sehingga akhirnya menghasilkan lapisan tipis lebih banyak.



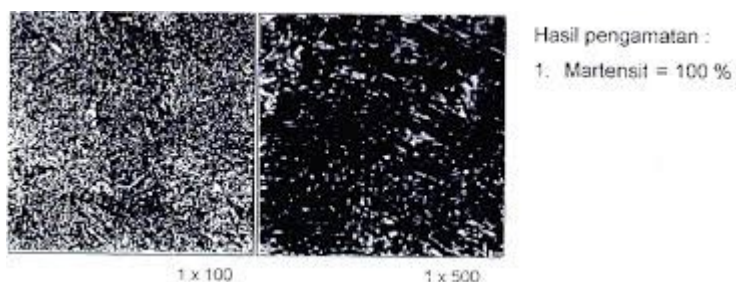
Gambar.2.4 perlit  
(Sumber : Rahman,2014)

*e. Martensit*

Adalah suatu fasa yang terjadi karena pendinginan yang sangat cepat sekali, dan terjadi pada suhu dibawah eutektoid tetapi masih diatas suhu



kamar. Karena struktur austenit FCC tidak stabil maka akan berubah menjadi struktur BCT secara serentak. Pada reaksi ini tidak terjadi difusi tetapi terjadi pengerasan (*dislokasi*). Semua atom bergerak serentak dan perubahan ini langsung dengan sangat cepat dimana semua atom yang tinggal tetap berada pada larutan padat karena terperangkap dalam kisi sehingga sukar menjadi slip, maka martensit akan menjadi kuat dan keras tetapi sifat getas dan rapuh menjadi tinggi. Martensit dapat terjadi bila austenit didinginkan dengan cepat sekali (dicelup) hingga temperatur dibawah pembentukkan bainit.



Gambar.2.5 Martensite  
(Sumber : Rahman,2014)

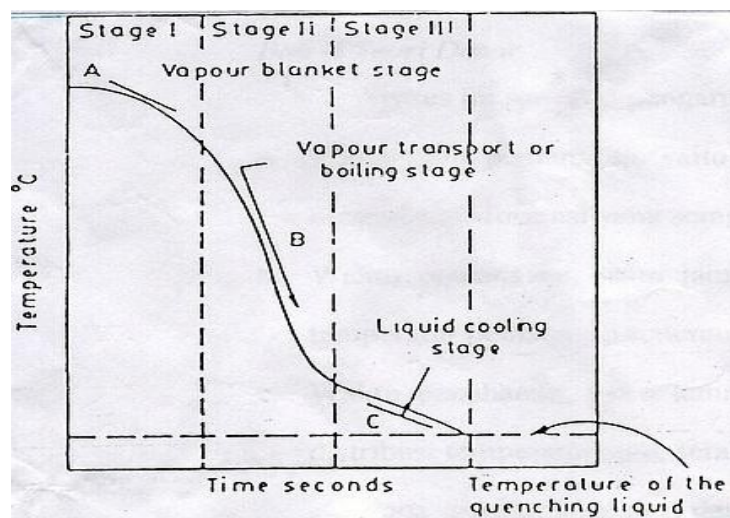
Martensit terbentuk karena transformasi tanpa difusi sehingga atom- atom karbon seluruhnya terperangkap dalam larutan super jenuh. Keadaan ini yang menimbulkan distorsi pada struktur kristal martensit dan membentuk BCT. Tingkat distorsi yang terjadi sangat tergantung pada kadar karbon. Karena itu martensit merupakan fasa yang sangat keras namun getas. Dapat dilakukan dengan satu unsur atau lebih, tergantung dari karakteristik atau sifat khusus yang dikehendaki.

Unsur-unsur paduan untuk baja ini dibagi dalam dua golongan yaitu :

- a. Unsur yang membuat baja menjadi kuat dan ulet, dengan menguraikannya ke dalam ferrite (misalnya Ni, Mn, sedikit Cr dan Mo). Unsur ini terutama digunakan untuk pembuatan baja konstruksi.
- b. Unsur yang bereaksi dengan karbon dalam baja dan membentuk karbida yang lebih keras dari sementit (misalnya unsur Cr, W, Mo, dan V) unsur ini terutama digunakan untuk pembuatan baja perkakas.

## 2.9 Quenching

Quenching adalah proses pendinginan setelah mengalami pemanasan. Media quenching dapat berupa oli, air, air garam, dan lain-lain sesuai dengan material yang diquenching. Dimana kondisi sangat mempengaruhi tingkat kekerasan. Pada quenching proses yang paling cepat akan menghasilkan kekerasan tertinggi. Jika suatu benda kerja diquench ke dalam medium quenching, lapisan cairan disekeliling benda kerja akan segera terpanasi sehingga mencapai titik didihnya dan berubah menjadi uap. Berikut adalah 3 tahap pendinginan :



Gambar 2.6 Diagram Tahap Pendinginan  
(Sumber : Rahman,2014)

Seperti pemanasan, pendinginan juga bekerja tidak merata pada keseluruhan penampang benda kerja (dari luar kedalam).

Untuk proses quenching harus melakukan pendinginan secara cepat dengan menggunakan media Oli. Tujuannya adalah untuk mendapatkan struktur martensite, semakin banyak unsur karbon, maka struktur martensite yang terbentuk juga akan semakin banyak. Karena martensite terbentuk dari fase Austenite yang didinginkan secara cepat. Hal ini disebabkan karena atom karbon tidak sempat berdifusi keluar dan terjebak dalam struktur kristal dan membentuk struktur tetagonal yang ruang kosong antar atomnya kecil, sehingga kekerasannya meningkat.

Untuk mendinginkan bahan di kenal berbagai macam bahan, dimana untuk memperoleh pendinginan yang merata maka bahan pendinginan tersebut

hampir semuanya di sirkulasi, contohnya yaitu :

1. Air

Air memberi pendinginan yang sangat cepat. Untuk memperbesar daya pendinginan air, maka kedalam air tersebut dilarutkan garam dapur dari 5 sampai 10 %.

2. Minyak / Oli

Minyak / oli memberi pendinginan yang cepat, oleh karena untuk keperluan ini minyak harus memenuhi berbagai macam persyaratan.

3. Udara

Udara memberi pendinginan yang perlahan-lahan. Udara tersebut ada yang disirkulasi dan ada pula yang tidak disirkulasi.

4. Garam

Garam memberi pendinginan yang cepat dan merata. Garam tersebut terutama digunakan untuk proses Hardening. Garam dipakai sebagai bahan pendinginan disebabkan memiliki sifat mendinginkan yang teratur dan cepat. Bahan yang didinginkan di dalam cairan garam akan mengakibatkan ikatnya menjadi lebih keras karena pada permukaan benda kerja tersebut akan mengikat zat arang (Soedjono, 1978). Cairan garam merupakan larutan garam dan air, titik didih larutan akan lebih tinggi daripada pelarut murninya. Besarnya kenaikan titik didih larutan dalam persamaan dinyatakan dengan:

$$\Delta T_d = K_d \times m \dots\dots\dots(1)$$

dimana:  $K_d$  = tetapan kesetaraan titik didih molal yang tergantung pada jenis pelarut, untuk air sebesar  $0,52^\circ\text{C m}^{-1}$

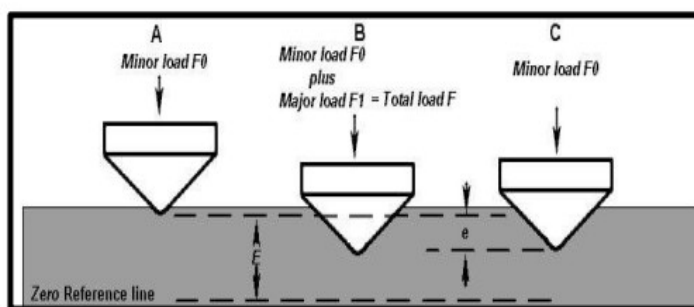
$m$  = molalitas larutan Keuntungan menggunakan air garam sebagai media pendingin adalah pada proses pendinginan suhunya merata pada semua bagian permukaan, tidak ada bahaya oksidasi, karburasi atau dekarburasi (Gary, 2011). Kemampuan suatu media dalam mendinginkan sampel berbeda-beda yang dipengaruhi oleh temperatur, kekentalan, kadar larutan dan bahan dasar pendingin (Soedjono, 1978).

## 2.10 Uji Kekerasan *Rockwell*

Uji Kekerasan Pada umumnya kekerasan diartikan sebagai ketahanan

terhadap deformasi, sedangkan nilai kekerasan pada logam adalah ukuran ketahanan logam terhadap deformasi permanen atau plastis. Ada tiga tipe umum pengukuran kekerasan tergantung bagaimana pengujian tersebut dilakukan, yaitu scratch Hardness adalah pengukuran yang didasarkan pada kemampuan logam terhadap goresan. Pengukuran ini didasarkan skala mohs. Indentation Hardness adalah pengukuran didasarkan pada kedalaman atau lebar goresan yang dibuat oleh suatu identor pada permukaan logam dengan beban tertentu. Pada saat teknik pengukuran dengan indantasi merupakan teknik pengukuran yang banyak dilakukan karena mudah untuk dilakukan dan tidak merusak spesimen secara berlebihan. Adapun beberapa teknik pengukuran kekerasan dengan indentasi yang banyak dilakukan adalah pengujian kekerasan Rockwell sesuai dengan yang ditetapkan oleh ASTM Standar E-18, pengujian kekerasan Brinell sesuai dengan ASTM Standar E-10, dan Pengujian kekerasan Vickers sesuai dengan ASTM Standar E-29.

Pada uji kekerasan dengan metode Rockwell benda uji ditekan dengan penetrator (bola baja dan intan, dll). Harga kekerasan diperoleh dari perbedaan kedalaman dari beban mayor dan minor. Beban minor merupakan beban awal yang diberikan untuk pengujian Rockwell yang sudah ditentukan, sedangkan beban mayor merupakan beban minor ditambah dengan beban tambahan yang diberikan saat 38 pengujian kekerasan. Nilai kekerasan berdasarkan kedalaman penekanan identor dan hasilnya dapat langsung dibaca pada jarum penunjuk indikator di mesin Rockwell. Ilustrasi pengujian kekerasan dapat dilihat pada gambar di bawah ini



Gambar.2.7 Penetrasi Rockwell,  $F_0$  = beban awal (preliminary minor load in kgf),  $F_1$  = beban tambahan (additional major load in kgf),  $F$  = beban total (total load in kgf) (Sumber :Higinss, 1999).

Nilai kekerasan Rockwell

$$(HR): HR = E - e \dots\dots\dots (2)$$

Dimana:

e = penambahan kedalaman penetrasi dari beban mayor, diukur dalam unit 0,002 mm

E = konstanta tergantung dari indenter. 100 unit untuk diamond indenter

Tabel 2.2 Skala Rockwell Hardness

Scale	Indenter	Minor Load $F_0$ kgf	Major Load $F_1$ kgf	Total Load $F$ kgf
A	Diamond cone	10	50	60
B	1/16" steel ball	10	90	100
C	Diamond cone	10	140	150
D	Diamond cone	10	90	100
E	1/8" steel ball	10	90	100
F	1/16" steel ball	10	50	60
G	1/16" steel ball	10	140	150
H	1/8" steel ball	10	50	60
K	1/8" steel ball	10	140	150
L	1/4" steel ball	10	50	60
M	1/4" steel ball	10	90	100
P	1/4" steel ball	10	140	150
R	1/2" steel ball	10	50	60
S	1/2" steel ball	10	90	100
V	1/2" steel ball	10	140	150

## 2.11 Uji Struktur Mikro

Uji Struktur Mikro Pengamatan struktur mikro adalah suatu pengujian untuk mengetahui susunan fasa pada suatu benda uji atau spesimen. Struktur mikro dan sifat paduannya dapat diamati dengan berbagai cara bergantung pada sifat informasi yang dibutuhkan. Salah satu cara dalam mengamati struktur suatu bahan yaitu dengan teknik metalografi (pengujian mikroskopik). Mikroskop mikro yang digunakan untuk mengamati struktur bahan (Bahtiar.2017).

#### a. Metalografi

adalah ilmu yang berkaitan dengan penyusunan dari mikrostruktur logam dan paduan yang dapat dilihat langsung oleh mata maupun dengan bantuan peralatan seperti mikroskop optik, mikroskop elektron SEM (Scanning Electron Microscope), dan difraksi sinar-X. Metalografi tidak hanya berkaitan dengan struktur logam tetapi juga mencakup pengetahuan yang diperlukan untuk 34 preparasi awal permukaan bahan. Sampel metalografi harus memenuhi kriteria yaitu mewakili sampel, cacat dipermukaan minimum bebas goresan, lubang cairan lengket, inklusi, presipitat, fasa terlihat jelas, permukaan sampel datar sehingga perbesaran maksimum mampu dicapai, dan permukaan sampel bagian pinggir tidak rusak (Noviano, 2010).

Proses terjadinya perbedaan warna, besar butir, bentuk dan ukuran butir yang mendasari penentuan dari jenis dan sifat fasa pada hasil pengamatan foto mikro adalah di akibatkan adanya proses pengetsaan. Salah satu jenis bahan yang digunakan dalam pengetsaan adalah Aqua Regia. Prinsip dari pengetsaan sebenarnya merupakan proses pengikisan mikro terkendali yang menghasilkan alur pada permukaan akibat crystal faceting yaitu orientasi kristal yang berbeda (batas butir), akan terjadi reaksi kimia yang berbeda intensitasnya. Maka atom- 36 atomnya akan lebih mudah terlepas sehingga terkikis lebih aman. Akibatnya adanya perbedaan ini dan bergantung pada arah cahaya pantulan yang tertangkap oleh lensa maka akan tampak bahwa fasa yang lebih lunak akan terlihat lebih terang dan fasa yang lebih keras akan terlihat gelap. Begitu juga akan terlihat bentuk dan ukuran butirannya sehingga dapat dibedakan fasa-fasa yang terlihat dalam bahan yang akan diuji (Van Vlack, 1992). Secara umum prinsip kerja mikroskop optik adalah sinar datang yang berasal dari sumber cahaya melewati lensa kondensor, lalu sinar datang itu menuju glass plane yang akan memantulkannya menuju sampel. Sebelum mencapai sampel, sinar datang melewati beberapa lensa pembesar. Kemudian sinar datang tersebut sebagian akan dipantulkan kembali, sedangkan sebagian lagi akan menyimpang akibat mengenai permukaan yang telah terkorosi pada saat pengetsaan. Sinar datang yang dipantulkan kembali ke mikroskop optik akan diteruskan ke lensa okuler sehingga dapat diamati.

## 2.12 Sifat Mekanik Bahan

Sifat mekanik suatu bahan adalah kemampuan bahan untuk menahan beban-beban yang dikenakan kepadanya. Dimana beban-beban tersebut dapat berupa beban tarik, tekan, bengkok, geser, puntir, atau beban kombinasi (Herry Z. 2011). beberapa sifat mekanis logam antara lain:

a. Kekuatan (*strenght*)

Menyatakan kemampuan bahan untuk menerima tegangan tanpa menyebabkan bahan tersebut menjadi patah.

b. Kekerasan (*hardness*)

Dapat didefinisikan sebagai kemampuan bahan untuk tahan terhadap goresan, pengikisan (abrasi), penetrasi. Sifat ini berkaitan erat dengan sifat keausan (wear resistance).

c. Kekenyalan (*elasticity*)

Menyatakan kemampuan bahan untuk menerima tegangan tanpa mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk yang permanen setelah tegangan dihilangkan.

d. Kekakuan (*stiffness*)

Menyatakan kemampuan bahan untuk menerima tegangan / beban tanpa mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk (deformasi) atau defleksi.

e. Plastisitas (*plasticity*)

Menyatakan kemampuan bahan untuk mengalami sejumlah deformasi plastis (yang permanen) tanpa mengakibatkan terjadinya kerusakan. Sifat ini sangat diperlukan bagi bahan yang akan diproses dengan berbagai proses pembentukan seperti, forging, rolling, extruding dan sebagainya. Sifat ini sering juga disebut sebagai keuletan atau kekenyalan (ductility). Bahan yang mampu mengalami deformasi plastis yang cukup tinggi dikatakan sebagai bahan yang mempunyai keuletan atau kekenyalan tinggi, dimana bahan tersebut dikatakan ulet atau kenyal (ductile).